

刘显通, 刘奇, 傅云飞. 2011. 基于光学厚度和有效半径的白天降水云识别方案 [J]. 大气科学, 35 (5): 903–911. Liu Xiantong, Liu Qi, Fu Yunfei. 2011. Daytime precipitating clouds identification scheme relying on optical thickness and effective radius [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (5): 903–911.

基于光学厚度和有效半径的白天降水云识别方案

刘显通 刘奇 傅云飞

中国科学技术大学地球和空间科学学院, 大气探测与气候环境实验室, 合肥 230026

摘要 基于卫星资料观测和反演降水是当前监测全球尺度降水的主要方式, 而其中一大难题就是如何将降水云与非降水云在像素尺度进行有效分离, 这也是准确反演地表降水量的基本前提。为建立一套适用于常见星载可见光/红外探测仪器的降水云识别方法, 本文利用热带测雨卫星 (TRMM) 可见光/红外辐射计 (VIRS) 和测雨雷达 (PR) 的融合观测资料, 针对选定的代表性区域, 统计分析了较长时间尺度上降水云与非降水云的典型云属性差异。在此基础上, 提出了一种基于云光学厚度和云滴有效半径的白天降水云识别方案 ($IPC_{\tau} R_c$)。由于用来获取上述云参数的可见光/红外信号无法透过降水性云层, 此方案不受下垫面条件的影响, 适用于陆地和海洋区域。为验证 $IPC_{\tau} R_c$ 方案的降水云识别效果, 本文以 PR 瞬时降水探测结果为真值, 采用三种二元预报评价因子对识别结果进行了定量评估, 并与 Inoue and Aonashi (2000) 和 Nauss and Kokhanovsky (2006) 提出的降水云识别方案进行了比较。研究表明, $IPC_{\tau} R_c$ 方案的降水云识别性能均高于其它两种方案。特别是在洋面上, 降水云识别比例达到 84%, 而对非降水云的误判率只有 6%, 到达了降水卫星监测和预报业务所要求的精度。

关键词 降水云识别 光学厚度 有效半径 热带测雨卫星

文章编号 1006-9895 (2011) 05-0903-09 **中图分类号** P426 **文献标识码** A

Daytime Precipitating Clouds Identification Scheme Relying on Optical Thickness and Effective Radius

LIU Xiantong, LIU Qi, and FU Yunfei

Laboratory of Atmospheric Observation and Climatological Environment, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

Abstract Satellite remote sensing is currently the most important way of global-scale precipitation observations. The identification of precipitating clouds based on the satellite-borne measurements is still one of the most challenging problems. In order to get a universal precipitating-cloud identification method available for common optical satellite measurements, the relationship between cloud parameters and precipitating-cloud pixels is analyzed by using matched TRMM Visible and Infrared Scanner (VIRS) and Precipitation Radar (PR) long time scale measurements in the selected regions. According to the derived characteristic cloud parameters of precipitating clouds that is contrast to non-precipitating clouds, a daytime precipitating clouds detection scheme, called Identification of Precipitat-

收稿日期 2010-09-30, 2011-03-21 收修定稿

资助项目 国家科技基础性工作专项 2007FY110700, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY200906002、GYHY200906003, 国家重点基础研究发展规划项目 2010CB428601, 中国科学院科技创新项目 KZCX2-YW-Q11-04、KJCX2-YW-N25, 国家自然科学基金资助项目 40730950、40805007

作者简介 刘显通, 男, 1985 年出生, 博士研究生, 主要从事利用卫星遥感资料研究云和降水。E-mail: wmtzstc@mail.ustc.edu.cn

通讯作者 傅云飞, E-mail: fyf@ustc.edu.cn

ing Clouds from Optical Thickness and Effective Radius ($IPC\tau R_e$), is proposed relying on both cloud optical thickness and effective radius. As the cloud parameters are retrieved from the visible and infrared signals that cannot penetrate the precipitating clouds, the $IPC\tau R_e$ scheme can be used operationally over both ocean and land areas. Comparison to PR standard rain products is conducted to verify the $IPC\tau R_e$ results, in which three dimidiate-forecast factors are utilized and two other precipitating-cloud identification schemes are also evaluated, with one proposed by Inoue and Aonashi (2000) and the other proposed by Nauss and Kokhanovsky (2006). The study proves that $IPC\tau R_e$ scheme gives better spatial depiction of precipitating clouds. Especially, in oceanic areas, precipitating and nonprecipitating clouds are well separated by current method, with the probability of detection near 0.84 and probability of false detection remaining just 0.06, indicating a satisfying accuracy for satellite monitoring and forecasting of precipitation operations.

Key words precipitating-cloud identification, optical thickness, effective radius, TRMM

1 引言

降水提供了人类所赖以生存的淡水资源,同时也是全球大气和水文循环中的重要环节。掌握降水时空分布信息不仅有助于我们深入理解全球气候和水文变化,也有利于提高短期预报和临近预报模式的预报精度。在夏季汛期,及时准确地预报降水的时空分布信息,更是防范和应对洪涝灾害的有效手段。

降水时空变化剧烈,常规地基站和机载仪器难以进行长时间和大范围的监测,卫星仪器观测有效地克服了这些局限。基于卫星仪器观测降水,其中一大难题就是如何将降水云与非降水云进行有效分离(Stephens and Kummerow, 2007)。为此,近几十年来,针对不同卫星平台和探测仪器发展了多套识别降水云的算法,按照使用观测通道的波段可以分为:可见光/红外法(Arkin and Meisner, 1987; Adler and Negri, 1988; Arkin and Xie, 1994; Inoue and Aonashi, 2000; Thies et al., 2008)、被动微波法(Spencer, 1986; Spencer et al., 1989; Olson et al., 1996; Liu and Curry, 1998; Kummerow et al., 2000; Boukabara et al., 2002)、主动微波法(Simpson et al., 1996; Iguchi et al., 2000; Kummerow et al., 2000; Krishnamurti et al., 2001; Stephens et al., 2002)和云参数法(Rosenfeld and Lensky, 1998; Nauss and Kokhanovsky, 2006; Chen et al., 2007)。

可见光/红外法使用的通道波长统一,数据最为常见,空间分辨率最高,方法最为简单。但可见光红外通道主要反映云顶信息,与云中降水特征仅存在间接的物理联系,相应的降水云识别效果有

限。相比于可见光/红外通道,被动微波信号反映了云柱内云滴和降水粒子与微波的相互作用,对降水的探测更为直接(Olson et al., 1996)。然而,由于微波段探测的空间分辨率偏低,存在“堵塞效应”(Short and North, 1990),故在反演时产生较大误差。同时,地表背景辐射信号也能到达卫星微波接收天线,干扰降水微波信号,因而该方法的应用范围很有限。主动微波法通过接收发射波束的降水粒子后向散射回波,实现对降水的有效探测。目前,搭载在热带测雨卫星(Tropical Rainfall Measuring Mission, 简称 TRMM)上的测雨雷达(Precipitation Radar, 简称 PR)是首部星载微波段测雨雷达,它可以探测热带副热带降水的三维结构及相应的潜热释放信息(Simpson et al., 1996)。但是,卫星上光谱仪器是目前最为广泛的探测手段,如静止卫星上的可见光/红外仪器探测时间密度和空间分辨率高,有效地利用可见光/红外探测资料来识别降水仍具有重要意义。云参数能反应云顶部云滴物理信息,与降水有内在的联系,而云参数可由光谱信息反演所获得,并且在反演过程中使用了辐射传输模式,模式中的大气参数结构在一定程度上建立了云顶附近信息与云降水的联系。因此,使用云参数来指示降水,是一种具有潜力的降水云识别方法。然而,目前云参数法使用的可见光/红外资料与降水探测资料在时空上难以匹配(Rosenfeld and Lensky, 1998; Nauss and Kokhanovsky, 2006; Chen et al., 2007),对这些方案识别效果的检验是一种挑战。

TRMM 卫星搭载的 PR 与可见光/红外辐射计(Visible and Infrared Sensor, 简称 VIRS),能提供时间同步的探测结果,为我们解决这一问题带来了

机遇。傅云飞等(2005)通过融合 PR 与 VIRS 探测结果,曾揭示夏季热对流降水个例降水云的云顶高度与雨顶高度随地表降水强度的关系,并分析了“云娜”台风过程中降水云与非降水云可见光/红外信息的差异(傅云飞等,2007)。Liu and Fu(2010)系统分析了东亚夏季盛行的锋面和台风系统中,降水云和非降水云在短波各探测通道的信号差异。Liu et al.(2008)也利用 VIRS 和 PR 的融合资料,并基于 ISCCP 云分类方法和 PR 对降水云的识别,对热带及副热带地区降水云和非降水云分布特征进行了统计分析,首次揭示了不同 ISCCP 云类型发生降水的概率分布,但未对与降水发生有较强指示意义的云参数特征进行深入研究。

本文在 Liu et al.(2008)研究工作的基础上,利用时空匹配的 VIRS 和 PR 融合资料,使用可见光和近红外通道数据反演得到云光学厚度(τ)和云滴有效半径(R_e),然后将云参数与 PR 探测资料相结合,统计 τ 和 R_e 与降水发生概率之间的关系,并利用 PR 对降水云的直接探测,实现对判别降水云像素的直接检验,选取 τ 和 R_e 最佳判断阈值,实现对降水云和非降水云像素快速而又准确的识别,初步建立一套基于光学厚度和有效半径特征的白天降水云识别方案 IPC τR_e (Identification of Precipitating Clouds from Optical Thickness and Effective Radius,简称 IPC τR_e)。

2 数据

2.1 TRMM 卫星资料

TRMM 卫星上搭载的 VIRS 有 5 个探测通道:可见光通道 CH1(中心波长 $0.65 \mu\text{m}$)、近红外通道 CH2($1.64 \mu\text{m}$)、中红外通道 CH3($3.75 \mu\text{m}$)以及两个热红外通道 CH4 和 CH5($10.8 \mu\text{m}$ 和 $12.0 \mu\text{m}$),工作方式为垂直轨道横向扫描,扫描宽度约为 720 km ,星下点分辨率为 2 km 。本文研究

中使用到的 VIRS 探测资料为经修正和标定的轨道资料 1B01。PR 是单频微波主动雷达,工作频率 13.8 GHz (波长约为 2.2 cm),扫描方式与 VIRS 一致,扫描宽度约为 220 km ,星下点分辨率为 4.3 km ,垂直分辨率 250 m 。本文中使用的 TRMM PR 轨道降水产品 2A25,该产品提供了像素级降水廓线、降水类型和近地表雨强(Iguchi et al., 2000)。这些资料已大量使用在热带及副热带降水与云的研究中(Fu and Liu, 2001; Liu and Fu, 2001; Fu et al., 2003; 傅云飞等, 2003, 2008; Li and Fu, 2005; 刘鹏和傅云飞, 2010)。

由于 PR 与 VIRS 对同一目标区观测时间差异在 1 s 以内,可以认为是准同步探测,但两者探测的空间分辨率不同,需要对 2A25 和 1B01 资料进行空间分辨率上的匹配和融合处理。引入高斯函数作为距离权重,对落入 PR 有效视场内的逐个 VIRS 像素依照其中心与 PR 中心的相对距离,将辐射强度、卫星观测角和太阳高度角等分别进行加权平均,最终获得一套 PR 分辨率下($\sim 4 \text{ km}$) VIRS 与 PR 的融合资料(以下简称为融合资料)。

2.2 云检测与云参数反演

本文云检测采用的是 VIRS 五通道白天可见光和红外云检测方案(CDVIR)(刘显通等,2010),对融合资料进行云检测,对检测结果有云的像素进行云参数反演。云参数采用二维查算表法(Nakajima and King, 1990)进行反演,在非水汽吸收的可见光波段选取 $0.65 \mu\text{m}$ 通道(CH1),水汽吸收的近红外波段选取 $1.64 \mu\text{m}$ 通道(CH2),采用在可见光/红外辐射传输领域被广泛应用的 SBDART 模式(Ricchiazzi et al., 1998),对热带(南北纬 20° 以内区域)和副热带(南北纬 $20^\circ \sim 40^\circ$ 之间区域)地区的不同地形(海洋、普通陆地以及沙漠),设置动态参数(如表 1 所示)进行模拟计算,建立不同卫星观测情形的二维查算表。

表 1 二维查算表动态参数设置

Table 1 Dynamic parameters setting of 2D lookup table

目标函数	变量名称	数目	取值范围
0.65 μm 通道反射比	云光学厚度 τ	15	0.5, 1, 2, 3, 4, 6, 8, ..., 96, 128
	云滴(液态水滴)有效半径 $R_e/\mu\text{m}$	7	4, 6, 8, 12, 16, 24, 32
	云滴(固态冰晶)有效半径 $R_e/\mu\text{m}$	9	4, 6, 8, 12, 16, 24, 32, 48, 64
1.64 μm 通道反射比	太阳天顶角/ $^\circ$	16	0, 5, 10, ..., 70, 75
	卫星天顶角/ $^\circ$	7	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30
	相对方位角/ $^\circ$	19	0, 10, 20, ..., 170, 180

3 方法

云光学厚度和云滴有效半径是能反应云物理性质的两个重要参数, 且与云水总量有很好的相关 (Hansen and Travis, 1974), 然而相关分析显示任一参数对降水事件的指示能力都极为有限 (Stephens and Kummerow, 2007)。为了解光学厚度和有效半径与降水事件发生的关系, 本文选取 1998~2000 年夏季, 典型陆地 [中国东部和华南地区 (20°N~40°N, 110°E~122.5°E)] 和海洋 [中国东海和黄海海域 (25°N~40°N, 120°E~128°E)] 区域的融合资料样本, 统计不同云参数条件下降水的发生概率 [图 1 (见文后彩图)]。从图 1 中可以发现, 云滴有效半径一定时, 云光学厚度越大 (即表示云越厚), 产生降水的概率越大, 同时光学厚度一定时, 随着有效半径增大 (即代表云滴半径增大), 其降水发生概率也增加。由此可见, 降水云在不同云参数区域的出现概率有所不同, 只要选取恰当 τ 和 R_c 。所对应的降水概率 (后文简称为降水概率) 作为判断阈值, 就可以将降水云和非降水云有效分离。

判断阈值的选取是降水云识别方案的关键, 如果选取的阈值太低, 则会有很多非降水云像素被误判为降水云像素, 而如果阈值选得太高, 则会导致漏判很多降水云像素。因此只有选取最优的阈值, 才能得到最佳的降水云识别效果。

降水云识别问题是典型的二元预报问题, 因而可以采用二元预报评估因子对所选取的阈值进行优劣评价, 得出最佳阈值。由于降水事件在融合资料样本总量中出现较少, 而且随季节和地域不同, 其发生概率变化较大。为降低这些因素的影响, 本文选取二元预报检验中的 CSI (Critical Success Index) 指数、ETS (Equitable Threat Score) 评分和 HSS (Heidke Skill Score) 评分作为评估因子, 以获得最佳判断阈值。二元预报检验中, 观测和预报结果组成二元预报相关表 (如表 2 所示), CSI 指数、ETS 评分和 HSS 评分值由此表计算得到。

表 2 二元预报相关表

Table 2 Contingency table for yes/no forecasts

	观测	
	是	否
预报 (是)	命中 (A)	误报 (B)
预报 (否)	漏报 (C)	正确拒绝 (D)

CSI 指数定义如下:

$$CSI = \frac{A}{A+B+C} \quad (1)$$

公式 (1) 中 A 、 B 和 C 的定义参见表 2 (下同)。CSI 指数取值范围为 0 到 1, 其中 0 代表无效, 1 代表预报效果最好。

ETS 评分计算公式如下:

$$ETS = \frac{A - H_r}{A+B+C-H_r} \quad (2)$$

其中,

$$H_r = \frac{(A+B)(A+C)}{T} \quad (3)$$

T 为总的事件数目。ETS 评分值域为 $-1/3$ 至 1, 1 意味着预报效果最佳。

HSS 评分表达式如下:

$$HSS = \frac{2(AD - BC)}{(A+B)(B+D) + (A+C)(C+D)} \quad (4)$$

HSS 评分数值范围为 -1 到 1, 预报最优值为 1。三个因子的评分值越大表示预报精度越高, 最佳值都是 1。上述三个评估因子对多种因素进行了综合考虑 (尤其是 HSS 评分, 考虑的因素最多最全面), 即兼顾了高探测率和低虚警率, 还考虑了降水事件与非降水事件绝对数量的差异, 因而这些因子值的高低就代表了判断阈值选取的优劣。

为筛选得到最佳判断阈值, 本文采用不同判断阈值, 对样本资料进行降水云识别和检验。降水云识别实验中, 若某一像素云参数值所在点的降水概率高于判断阈值, 则该像素的识别结果为降水云, 否则为非降水云。据此, 我们对 1998~2000 年融合资料样本反演所得的 τ 和 R_c 进行降水云识别, 统计三个因子值如图 2 所示。从图 2 中可以发现, 陆地和海洋地区三个因子的值随着降水概率的增加, 都呈现增加后减少趋势, 其中陆地区域以降水概率 0.30 作为判断阈值时, 三个因子都到达最高值, 海洋区域则在 0.35 处达到峰值。这说明, 在陆地上选取 0.30 作为判断阈值, 其降水云识别效果最佳, 在洋面上则应采用 0.35 作为阈值。同时, 海洋地区三个因子的值都要高于陆地, 这表明该方案在洋面上的识别效果要好于陆地。

为方便使用, 对陆地和海洋地区的判断阈值进行曲线模拟 (如图 1 所示), 其中, 陆地区域的阈值曲线方程:

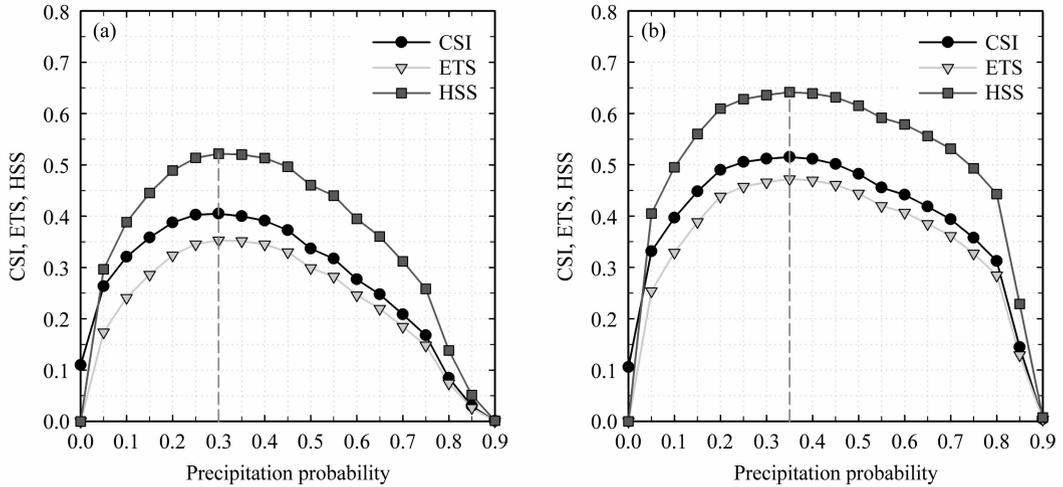


图 2 选取不同降水概率作为判断阈值对应的 CSI 指数、ETS 评分和 HSS 评分值：(a) 典型陆地区域；(b) 典型海洋区域

Fig. 2 Averaged values of CSI, ETS, and HSS in different decision schemes of precipitation probability in (a) typical land areas and (b) typical sea areas

$$\begin{cases} R_c = \frac{3(\tau - 104)^2}{800} + 14 & (\tau < 128), \\ R_c = 8 & (\tau = 128). \end{cases} \quad (5)$$

海洋区域的阈值曲线方程：

$$\begin{cases} R_c = \frac{3(\tau - 101)^2}{800} + 16 & (\tau < 128), \\ R_c = 8 & (\tau = 128). \end{cases} \quad (6)$$

这样，(5)、(6) 式的阈值变化曲线就给出了降水云识别的阈值。

依据上述阈值， $IPC_{\tau} R_c$ 方案由云检测、云参数反演和降水云识别三个基本步骤构成。首先，使用 CDVIR 法对卫星观测数据进行云检测；其次，对云检测结果为完全云覆盖的像素进行云参数反演；最后，将反演所得的光学厚度和有效半径值与相应区域的阈值曲线进行比较，若值在阈值曲线左下方，识别结果为非降水云，若值在阈值曲线右上方，则识别结果为降水云。

4 应用

为检验 $IPC_{\tau} R_c$ 降水云识别方案的效果，本文选取 2003 年夏季 25 条 TRMM PR 探测有降水的轨道（为独立于产生阈值外的样本），使用 $IPC_{\tau} R_c$ 法进行降水云识别，同时使用 C12（Ch1/Ch2）法（Inoue and Aonashi, 2000）和 RADS（Rain Area Delineation Scheme）法（Nauss and Kokhanovsky, 2006）对相同数据进行相应降水云识别，并将识别结果与 PR 探测结果进行比较，通过对比得到三种

方法识别降水云性能优劣的评估。

为全方位考察三种方法性能的优劣，本文选取二元预报中常用的七个评价因子，对识别结果进行统计，表 3 和表 4 分别给出三种方法在陆地和洋面上的评价因子值。

表 3 三种方法在典型陆地区域检测降水云结果统计

Table 3 Results of the standard verification scores applied to typical land areas as identified by C12 scheme, RADS, and $IPC_{\tau} R_c$ scheme

方法	POD	POFD	FAR	CSI	ETS	HSS
C12	0.634	0.090	0.330	0.483	0.384	0.555
RADS	0.810	0.204	0.466	0.474	0.344	0.512
$IPC_{\tau} R_c$	0.732	0.118	0.359	0.520	0.413	0.585

表 4 三种方法在典型海洋区域检测降水云结果统计

Table 4 Results of the standard verification scores applied to typical sea areas as identified by C12 scheme, RADS, and $IPC_{\tau} R_c$ scheme

方法	POD	POFD	FAR	CSI	ETS	HSS
C12	0.780	0.085	0.412	0.505	0.440	0.611
RADS	0.905	0.115	0.450	0.520	0.450	0.620
$IPC_{\tau} R_c$	0.839	0.057	0.305	0.614	0.562	0.719

统计得出，在陆地上，RADS 法对降水云的识别率（Probability of detection，简称 POD）最高，达 81% 左右， $IPC_{\tau} R_c$ 法次之，约为 73%，C12 法最低，只有 63%。但与此同时，RADS 法将非降水云

误判为降水云的比例 (Probability of false detection, 简称 POFD) 也最高, 达 20% 左右, $IPC_{\tau R_c}$ 法约为 12%, C12 法最低, 只误判了 9% 左右。如前文所述, 由于降水的特性, POD、POFD 和 FAR (False alarm ratio) 这三个因子难以比较三种方法的优劣, 相比之下, CSI、ETS 和 HSS 这三个因子更为合适。对比后三个评价因子值可以看出, 在陆地上, $IPC_{\tau R_c}$ 法三个因子值最高, 其中 CSI 值为 0.52, ETS 值为 0.41, HSS 值为 0.59, 这表明 $IPC_{\tau R_c}$ 法识别降水云的效果最好, C12 次之, RADS 效果最差。

在洋面上, 三种方法识别降水云的比例要远高于陆地, 其中 RADS 法检测降水云的比例仍然最高, 高达 91% 左右, $IPC_{\tau R_c}$ 法约为 84%, C12 法最低, 但也有 78% 左右。三种方法对非降水云误判率也要显著低于陆地, 其中 RADS 法最高, 只有 12% 左右, C12 法约为 9%, $IPC_{\tau R_c}$ 法最低, 仅为 6%。对比 CSI、ETS 和 HSS 因子值可以看到, $IPC_{\tau R_c}$ 法三个因子的值最高, 其中 CSI 值为 0.61, ETS 值为 0.56, HSS 值达 0.72, 远远高于 C12 法和 RADS 法, 这表明 $IPC_{\tau R_c}$ 法在洋面上对降水云的识别效果要远远好于 C12 法和 RADS 法。C12 法和 RADS 法三个因子值接近, 因而这两种方法在洋面的检测效果接近。

与洋面统计结果比较, 三种方法对于陆地上的降水云判别能力均偏低。造成这一现象, 一方面可能是因为陆地为非均匀下垫面, 致使云的不均匀性要高于洋面, 另一方面可能是陆地云的云凝结核来源更为多样化, 尤其含有不少人类活动排放的细粒子 (Ramanathan et al., 2001), 使得形成降水的微物理过程更为繁杂。这两方面的原因导致陆地降水云的结构较洋面更为复杂 (Rosenfeld and Lensky, 1998), 使用上述三种方法识别降水云的难度更大, 致使识别精度更低。

为了对 $IPC_{\tau R_c}$ 法对降水云识别能力有一个直观的认识, 本文选取其中一个个例进行详细分析。该个例轨道号为 31925, 探测时间为 2003 年 6 月 22 日, 是淮河汛期的一次锋面气旋系统, 降水尺度大, 且降水区域范围包含了陆地和海洋区域。郑媛媛等 (2004) 给出了该个例的大尺度气象背景资料, 并对其降水结构和闪电活动进行了系统研究, 为研究该个例提供了便利。图 3a (见文后彩图) 显

示的是 $0.65 \mu\text{m}$ 通道反射比, 图 3b-d (见文后彩图) 分别给出了三种方法对降水云的识别结果以及与 PR 探测结果比较情况。图 3 中灰色像素表示该方法和 PR 都检测为非降水云, 红色像素代表该方法识别为降水云而 PR 探测为非降水云, 即将非降水云误判为降水云, 绿色像素为该方法识别为非降水云而 PR 探测为降水云, 即漏判了降水云, 蓝色像素代表该方法和 PR 都检测为降水云。

对比三种方法识别结果可以发现, 在陆地上, C12 法在西侧降水云边缘区域出现的漏判现象, 同时南侧有误判了少部分的非降水云。RADS 法发生较少的漏判现象, 但在西侧和南侧降水云的边缘区域发生了大量的误判现象。相比之下, $IPC_{\tau R_c}$ 法漏判和误判的比例都较低, 整体效果要好于 C12 法和 RADS 法。在洋面上, 三种方法几乎没有发生漏判, 然而在东侧降水云的边缘区域, 三种方法均出现误判现象, 其中 C12 法和 RADS 法误判区域面积比例较大, C12 法尤甚, 而 $IPC_{\tau R_c}$ 法误判区域的比例小很多, 这说明 $IPC_{\tau R_c}$ 法效果要明显好于 C12 法和 RADS 法。

由图 3 还可以看到, 无论陆地还是洋面, 绝大部分漏判和误判现象出现在降水云边缘区域。对比该时刻的锋面位置和相应气旋气压场 (郑媛媛等, 2004), 可以发现这些降水云边缘区域都是降水发生或消散的区域, 降水云和非降水云正在相互转化, 因而此时降水云与非降水云在可见光/红外通道以及云参数上的差异都不太明显, 识别难度大, 这导致三种方法都出现了漏判和误判现象。然而, 对比三种方法的识别结果, $IPC_{\tau R_c}$ 法漏判和误判的区域最为狭窄, 由此可见, $IPC_{\tau R_c}$ 法更能有效地将降水云与非降水云进行区分。

5 结论

本文在研究云参数与降水发生概率关系的基础上, 统计降水云与非降水云在光学厚度和有效半径上的差异, 在不同区域筛选出最佳判断阈值, 提出一种白天利用光学厚度和有效半径特征来识别降水云的 $IPC_{\tau R_c}$ 方案。为对本方案识别降水云性能进行量化评估, 我们选取了独立的 25 条降水轨道进行降水云识别实验, 并采用多种二元预报评价因子将本方案识别结果与 PR 探测结果进行了系统地分析比较。

结果表明, 在陆地上, $IPC_{\tau R_e}$ 法降水云识别效果较好, 能识别出约 73% 的降水云, 将非降水云误判为降水云的比例只有约 12%, 相应 CSI、ETS 和 HSS 因子值都较高。在洋面上, $IPC_{\tau R_e}$ 法对降水云的识别效果更佳, 对降水云的识别比例达到 84%, 对非降水云误判率只有 6% 左右, 同时 CSI、ETS 和 HSS 因子值都要高于陆地情形, 可见 $IPC_{\tau R_e}$ 法在洋面上对降水云的识别效果要好于陆地。

总体而言, 无论是在陆地还是洋面情形, 本研究提出的 $IPC_{\tau R_e}$ 降水云识别方案都达到了较高的精度, 降水云识别性能均优于 C12 法和 RADS 法。与此同时, 本方案使用云参数作为降水云识别依据, 参数统一。云光学厚度和有效半径可以由常规可见光、近红外和热红外多通道信息反演获得, 大部分气象卫星搭载的可见光/红外探测仪器都拥有这些通道, 因而该方案适用范围广, 可移植性强。降水云是由阈值曲线判断得到, 算法流程简洁, 识别速度快。因此, $IPC_{\tau R_e}$ 方案适用于常见星载可见光/红外探测仪器, 为日常降水卫星监测和预报业务提供了一种新的方法, 同时也为深入研究云参数与降水的关系做了很好的铺垫。

尽管如此, 该方案仍存在一些不足之处, 有待进一步改进。首先, 云参数是通过辐射传输模式模拟计算, 再由二维查算法反演获得, 然而模式模拟时设置的大气环境参数和云参数都与探测时刻的实际情形有所不同, 因此云参数反演的精度必然会影 响降水云的识别精度。其次, TRMM PR 探测灵敏度为 17 dBZ (Schumacher and Houze, 2003), 相应降水强度约为 0.4 mm/h, 即无法探测降水强度小于 0.4 mm/h 的降水像素, 而这些像素正处于降水发生或消散阶段, 若能提取此类像素的云参数信息, 将有助于进一步提高降水云的识别精度。再次, 降水随地域和季节变化大, 而本文只对中国东部南部和东海黄海区域的夏季情形进行了系统研究, 今后需要对更多地区、不同季节、不同降水机制的降水进行深入研究, 使该方法的适用范围更为广泛。

参考文献 (References)

Adler R F, Negri A J. 1988. A satellite infrared technique to estimate tropical convective and stratiform rainfall [J]. *J. Appl. Meteor.*, 27 (1): 30–51.

- Arkin P A, Meisner B N. 1987. The relationship between large-scale convective rainfall and cold cloud over the Western Hemisphere during 1982–84 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 115 (1): 51–74.
- Arkin P A, Xie P P. 1994. The global precipitation climatology project: First algorithm intercomparison project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 75 (3): 401–419.
- Boukabara S A, Hoffman R N, Grassotti C, et al. 2002. Physically based modeling of QuikSCAT SeaWinds passive microwave measurements for rain detection [J]. *J. Geophys. Res.*, 107, 4786, doi: 10.1029/2001JD001243.
- Chen R Y, Chang F L, Li Z Q, et al. 2007. Impact of the vertical variation of cloud droplet size on the estimation of cloud liquid water path and rain detection [J]. *J. Atmos. Sci.*, 64 (11): 3843–3853.
- 傅云飞, 宇如聪, 徐幼平, 等. 2003. TRMM 测雨雷达和微波成像仪对两个中尺度特大暴雨降水结构的观测分析研究 [J]. *气象学报*, 61 (4): 421–431. Fu Yunfei, Yu Rucong, Xu Youping, et al. 2003. Analysis on precipitation structures of two heavy rain cases by using TRMM PR and TMI [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 61 (4): 421–431.
- 傅云飞, 冯静夷, 朱红芳, 等. 2005. 西太平洋副热带高压下热对流降水结构特征的个例分析 [J]. *气象学报*, 63 (5): 750–761. Fu Yunfei, Feng Jingyi, Zhu Hongfang, et al. 2005. Structures of a thermal convective precipitation system happened in controlling of the western subtropical Pacific high [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 65 (5): 750–761.
- 傅云飞, 刘栋, 王雨, 等. 2007. 热带测雨卫星综合探测结果之“云娜”台风降水云与非降水云特征 [J]. *气象学报*, 65 (3): 316–328. Fu Yunfei, Liu Dong, Wang Yu, et al. 2007. Characteristics of precipitating and non-precipitating clouds in typhoon RANAN as viewed by TRMM combined measurements [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 65 (3): 316–328.
- 傅云飞, 张爱民, 刘勇, 等. 2008. 基于星载测雨雷达探测的亚洲对流和层云降水季尺度特征分析 [J]. *气象学报*, 66 (5): 730–746. Fu Yunfei, Zhang Aimin, Liu Yong, et al. 2008. Characteristics of seasonal scale convective and stratiform precipitation in Asia based on measurements by TRMM precipitation radar [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 66 (5): 730–746.
- Fu Y F, Liu G S. 2001. The variability of tropical precipitation profiles and its impact on microwave brightness temperatures as inferred from TRMM data [J]. *J. Appl. Meteor.*, 40 (12): 2130–2143.
- Fu Y F, Lin Y H, Liu G S, et al. 2003. Seasonal characteristics of precipitation in 1998 over East Asia as derived from TRMM PR [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 20 (4): 511–529.
- Hansen J E, Travis L D. 1974. Light scattering in planetary atmospheres [J]. *Space Science Reviews*, 16 (4): 527–610.
- Iguchi T, Kozu T, Meneghini R, et al. 2000. Rain-profiling algorithm for the TRMM precipitation radar [J]. *J. Appl. Meteor.*, 39 (12): 2038–2052.

- Inoue T, Aonashi K. 2000. A comparison of cloud and rainfall information from instantaneous visible and infrared scanner and precipitation radar observations over a frontal zone in East Asia during June 1998 [J]. *J. Appl. Meteor.*, 39 (12): 2292–2301.
- Krishnamurti T N, Surendran S, Shin D W, et al. 2001. Real-time multianalysis-multimodel superensemble forecasts of precipitation using TRMM and SSM/I products [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129 (12): 2861–2883.
- Kummerow C, Simpson J, Thiele O, et al. 2000. The status of the tropical rainfall measuring mission (TRMM) after two years in orbit [J]. *J. Appl. Meteor.*, 39 (12): 1965–1982.
- Li R, Fu Y F. 2005. Tropical precipitation estimated by GPCP and TRMM PR observations [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 22 (6): 852–864.
- Liu G S, Curry J A. 1998. An investigation of the relationship between emission and scattering signals in SSM/I data [J]. *J. Atmos. Sci.*, 55 (9): 1628–1643.
- Liu G S, Fu Y F. 2001. The characteristics of tropical precipitation profiles as inferred from satellite radar measurements [J]. *J. Meteor. Soc. Japan.*, 79 (1): 131–143.
- 刘鹏, 傅云飞. 2010. 利用星载测雨雷达探测结果对夏季中国南方对流和层云降水气候特征的分析 [J]. *大气科学*, 34 (4): 802–814. Liu Peng, Fu Yunfei. 2010. Climatic characteristics of summer convective and stratiform precipitation in southern China based on measurements by TRMM precipitation radar [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (4): 802–814.
- Liu Q, Fu Y F, Yu R C, et al. 2008. A new satellite-based census of precipitating and nonprecipitating clouds over the tropics and subtropics [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L07816, doi: 10.1029/2008GL033208.
- Liu Q, Fu Y F. 2010. Comparison of radiative signals between precipitating and non-precipitating clouds in frontal and typhoon domains over East Asia [J]. *Atmos. Res.*, 96 (2–3): 436–446.
- 刘显通, 刘奇, 傅云飞, 等. 2010. 基于 TRMM VIRS 可见光和红外五通道的白天云检测方案 [J]. *大气与环境光学学报*, 5 (2): 128–140. Liu Xiantong, Liu Qi, Fu Yunfei, et al. 2010. Day-time cloud detection scheme relying on five-channel measurements from TRMM VIRS [J]. *J. Atmos. Environ. Opt. (in Chinese)*, 5 (2): 128–140.
- Nakajima T, King M D. 1990. Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part I. Theory [J]. *J. Atmos. Sci.*, 47 (15): 1878–1893.
- Nauss T, Kokhanovsky A A. 2006. Discriminating raining from non-raining clouds at mid-latitudes using multispectral satellite data [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 6: 5031–5036.
- Olson W S, Kummerow C D, Heymsfield G M, et al. 1996. A method for combined passive – active microwave retrievals of cloud and precipitation profiles [J]. *J. Appl. Meteor.*, 35 (10): 1763–1789.
- Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. 2001. Aerosols, climate, and the hydrological cycle [J]. *Science*, 294 (5549): 2119–2124.
- Ricchiazzi P, Yang S R, Gautier C, et al. 1998. SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the earth's atmosphere [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79 (10): 2101–2114.
- Rosenfeld D, Lensky I M. 1998. Satellite-based insights into precipitation formation processes in continental and maritime convective clouds [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79 (11): 2457–2476.
- Schumacher C, Houze R A. 2003. The TRMM precipitation radar's view of shallow, isolated rain [J]. *J. Appl. Meteor.*, 42 (10): 1519–1524.
- Short D A, North G R. 1990. The beam filling error in the Nimbus 5 electronically scanning microwave radiometer observations of global Atlantic tropical experiment rainfall [J]. *J. Geophys. Res.*, 95 (D3): 2187–2193.
- Simpson J, Kummerow C, Tao W K, et al. 1996. On the tropical rainfall measuring mission (TRMM) [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 60 (1–3): 19–36.
- Spencer R W. 1986. A satellite passive 37-GHz scattering-based method for measuring oceanic rain rates [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 25 (6): 754–766.
- Spencer R W, Goodman H M, Hood R E. 1989. Precipitation retrieval over land and ocean with the SSM/I: Identification and characteristics of the scattering signal [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 6 (2): 254–273.
- Stephens G L, Vane D G, Boain R J, et al. 2002. The CloudSat mission and the A-Train [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83 (12): 1771–1790.
- Stephens G L, Kummerow C D. 2007. The remote sensing of clouds and precipitation from space: A review [J]. *J. Atmos. Sci.*, 64 (11): 3742–3765.
- Thies B, Nauss T, Bendix J. 2008. Discriminating raining from non-raining clouds at mid-latitudes using meteosat second generation daytime data [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 8: 2341–2349.
- 郑媛媛, 傅云飞, 刘勇, 等. 2004. 热带测雨卫星对淮河一次暴雨降水结构与闪电活动的研究 [J]. *气象学报*, 62 (6): 790–802. Zheng Yuanyuan, Fu Yunfei, Liu Yong, et al. 2004. Heavy rainfall structures and lightning activities in a cold-front cyclone happened in Huai River derived from TRMM PR and LIS observations [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62 (6): 790–802.

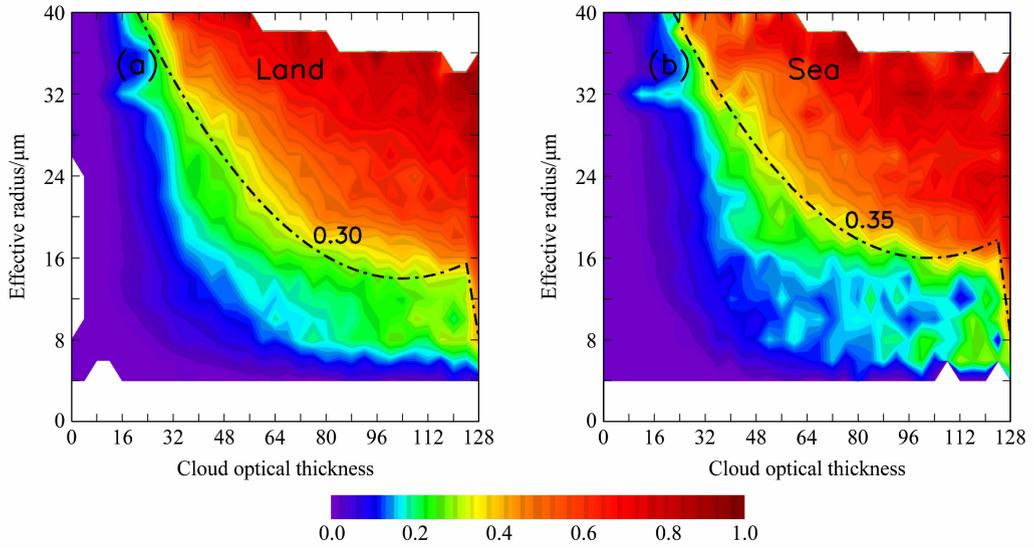


图 1 不同云光学厚度和云滴有效半径对应的降水概率分布：(a) 典型陆地区域（总像素：985651，降水像素：123671）；(b) 典型海洋区域（总像素：457701，降水像素：54987）

Fig. 1 Precipitation probability in various combinations of cloud optical thickness and effective droplet radius in (a) typical land areas (total pixel number: 985651, precipitation pixel number: 123671) and (b) typical sea areas (total pixel number: 457701, precipitation pixel number: 54987)

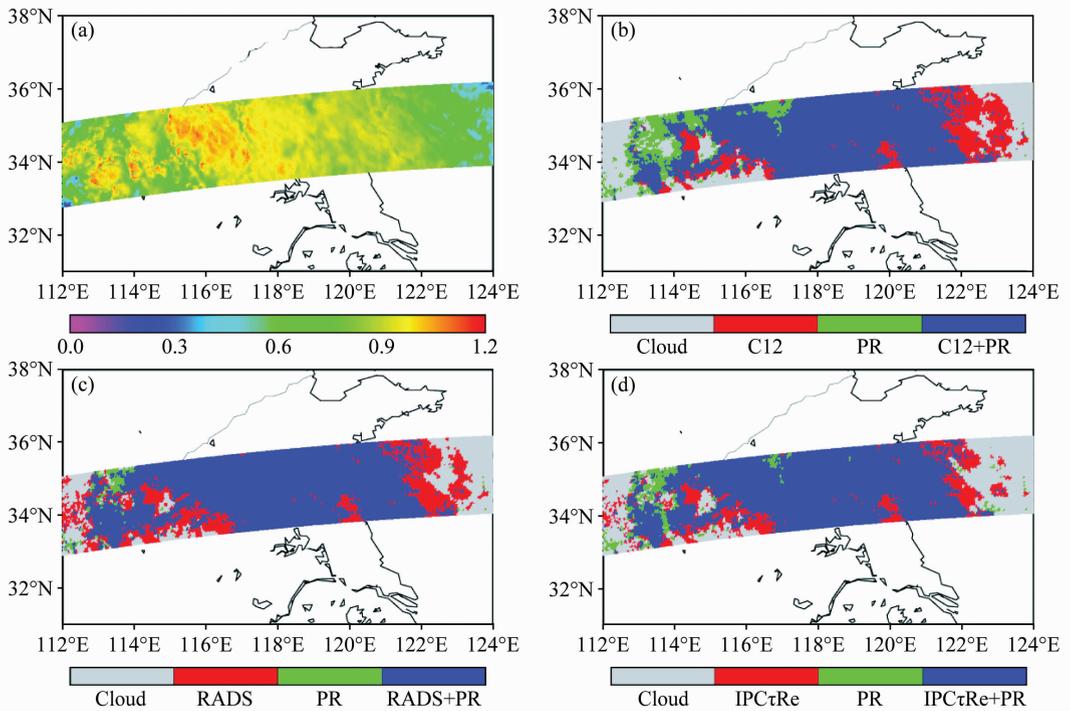


图 3 三种方法对锋面气旋个例降水云检测结果与 PR 实测的比较：(a) 0.65 μm 通道反射比；(b) C12 方案；(c) RADS 方案；(d) IPCτRe 方案

Fig. 3 Comparison between satellite and PR-based rainfall areas in a front sample: (a) 0.65 μm reflectance; precipitating clouds indicated by (b) C12 scheme, (c) RADS, and (d) IPCτRe scheme